

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE QUITO**

**CARRERA:
INGENIERÍA ELÉCTRICA**

**Trabajo de titulación previo a la obtención del título de
INGENIERO ELÉCTRICO**

**TEMA:
MITIGACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE UN SEP MEDIANTE
FILTROS PASIVOS SINTONIZADOS MODELADO EN MATLAB**

**AUTOR:
PAUL FERNANDO AGUIRRE TOPA**

**DIRECTOR:
CARLOS FABIÁN GALLARDO QUINGATUÑA**

Quito, agosto 2016

Paul Fernando Aguirre Topa

**MITIGACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE UN SEP MEDIANTE
FILTROS PASIVOS SINTONIZADOS MODELADO EN MATLAB**

Universidad Politécnica Salesiana, Quito – Ecuador 2016

Ingeniería Eléctrica

Breve reseña de autores e información de contacto:



Paul Fernando Aguirre Topa

Egresado de la Carrera de Ingeniería Eléctrica

Facultad de Ingenierías

Universidad Politécnica Salesiana

paulfernando83a@gmail.com

Dirigido por:



Carlos Fabián Gallardo Quingatuña

Ingeniero Eléctrico

Docente de la Universidad Politécnica Salesiana

Facultad de Ingenierías

cgallardo@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados:

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con la autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos o investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2016 Universidad Politécnica Salesiana

Quito – Ecuador

DECLARATORIA DE COAUTORÍA DEL DOCENTE TUTOR/A

Yo, Carlos Fabián Gallardo Quingatuña, declaro que bajo mi dirección y asesoría fue desarrollado el trabajo de titulación *Mitigación de la Distorsión Armónica de un SEP Mediante Filtros Pasivos Sintonizados Modelado en Matlab* realizado por Paul Fernando Aguirre Topa, obteniendo un producto que cumple con todos los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana para ser considerados como trabajo final de titulación.

Quito, agosto 2016

.....*Carlos Gallardo*.....

Dr. Carlos Fabián Gallardo Quingatuña


Cédula de identidad: 0602683401

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Yo, Paul Fernando Aguirre Topa, con documento de identificación N° 1717982530, manifiesto mi voluntad y cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor del trabajo de titulación intitulado: “Mitigación de la Distorsión Armónica de un SEP Mediante Filtros Pasivos Sintonizados Modelado en Matlab”, mismo que ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Eléctrico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en mi condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Firma



.....

Nombre: Paul Aguirre

Cédula: 1717982530

Fecha: 8 de agosto de 2016

INDICE GENERAL

Mitigación de la Distorsión Armónica de un SEP Mediante Filtros Pasivos Sintonizados Modelado en Matlab.....	1
Resumen.....	1
Abstract.....	1
1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Estándar IEEE 519 para la limitación armónica.....	3
1.2 Cálculo del factor armónico THDV.....	4
2. FILTROS PASIVOS DE POTENCIA	
2.1 Diseño de unidades de filtración armónica de sistemas de potencia.....	4
3. PROPAGACIÓN DE ARMÓNICAS EN UN SEP GENERAL	
3.1 Barrido de frecuencia (Frequency Scan).....	6
3.2 Método de inyección de corriente en el dominio de la frecuencia.....	7
4. MODELAMIENTO DE LOS COMPONENTES DEL SEP PARA EL ANÁLISIS DE ARMÓNICOS	
4.1 Líneas de transmisión.....	7
4.2 Transformadores.....	8
4.3 Generadores.....	8
4.4 Cargas lineales.....	8
4.5 Fuentes de generación armónica.....	8
5. CASO DE ESTUDIO	
5.1 Respuesta a la frecuencia.....	10
5.2 Tensiones armónicas sin filtros PPFs.....	11
5.3 Valores de la distorsión armónica sin filtros PPFs.....	12
5.4 Cálculo de parámetros RLC del PPFs.....	12
5.5 Respuesta a la Frecuencia con PPFs.....	13
5.6 Tensiones armónicas con PPFs.....	14
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	15
7. CONCLUSIONES	15
REFERENCIAS	14
ANEXOS	18

2 *INDICE DE FIGURAS*

2.1	Filtros Pasivos de Potencia Sintonizados (PPFs).....	4
2.2	Driving Point Impedance.....	6
2.3	Modelo II de Líneas de Transmisión.....	7
2.4	Caso de Estudio.....	9
2.5	Diagrama de Flujo del Análisis Armónico.....	9
2.6	Diagrama de Impedancias para el Estudio Armónico.....	10
2.7	Impedancia de las Barras hasta el Orden Armónico 30.....	10
2.8	Impedancia de las Barras hasta el Orden Armónico 15.....	10
2.9	Espectro Armónico de Voltaje sin filtro.....	11
2.10	Onda de Voltaje sin filtro para los Buses con Inyección Armónica.....	11
2.11	Impedancia para la Barra 14, con PPF Sintonizado al Orden Armónico 3.....	13
2.12	Impedancia para la Barra 13, con PPF Sintonizado al Orden Armónico 5.....	13
2.13	Impedancia para la Barra 5, con PPF Sintonizado al Orden Armónico 7.....	13
2.14	Espectro Armónico de Voltaje con FFPs.....	14
2.15	Onda de Voltaje con FFPs para los Buses con Inyección Armónica.....	14

3 *INDICE DE TABLAS*

3.1	Límites de Distorsión de Voltaje.....	3
3.2	Valores de Porcentajes de Inyección de Corriente Armónica.....	9
3.3	Porcentajes de THDv en las barras.....	12
3.4	Parámetros en Calculados para los Filtros de Sintonía Única.....	13
3.5	Parámetros RLC del filtro Sintonizado al Orden Armónico 3.....	13
3.6	Parámetros RLC del filtro Sintonizado al Orden Armónico 5.....	13
3.7	Parámetros RLC del filtro Sintonizado al Orden Armónico 7.....	13
3.8	Porcentajes de THDv con y sin PPFs.....	14

MITIGACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE UN SEP MEDIANTE FILTROS PASIVOS SINTONIZADOS MODELADO EN MATLAB

Paúl Aguirre ¹, Carlos Gallardo ²

Resumen

En este trabajo se presenta un método para mejorar la calidad de energía de un sistema eléctrico de potencia al suprimir la distorsión armónica, tomando como referencia el estándar IEEE 519-2014, en donde se han establecido las recomendaciones prácticas y requerimientos para el control de armónicos en sistemas eléctricos de potencia.

Para reducir el porcentaje de THD se ha utilizado circuitos RLC sintonizados a cada orden armónico a ser filtrado, el cual se ha instalado en paralelo a la carga no lineal, los parámetros RLC del filtro se han calculado bajo la norma IEEE 1531-2003.

Se utiliza un caso de estudio que permita realizar el modelado en la plataforma Matlab, este sistema tiene los parámetros necesarios para modelar el barrido de frecuencia y localizar condiciones de resonancia serie y paralelo. Para obtener los espectros armónicos de voltajes y porcentajes de la distorsión armónica total de voltaje se utiliza el método de inyección de corriente.

Finalmente, se presenta los valores de distorsión armónica total y espectro

Abstract

This paper presents a method to improve the power quality of a power system by eliminating the harmonic distortion, with reference to the standard IEEE519-2014, where it has been established recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems.

To reduce the THD has been used RLC circuits tuned to each harmonic order to be filtered, installed parallel to the nonlinear load, the RLC filter parameters have been calculated under the IEEE standard 1531-2003.

A case study is used for modeling in Matlab platform; this system has the necessary parameters to modeling of resonant conditions series and parallel for frequency scan. For to get voltage harmonic spectrum and percentages of total harmonic distortion it was used current injection method.

Finally, the values of total harmonic distortion and voltage harmonic spectrum are presented under acceptable limits of harmonic control. To illustrate the effect of reducing the percentage of total voltage harmonic distortion, and in consequence improvement of the power

¹ Egresado en Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica Salesiana, Sede Quito-Campus Kennedy. Autor para Correspondencia: paguirre@est.ups.edu.ec

² Doctor Ph.D en Ingeniería Eléctrica Electrónica y Automática- Universidad Carlos III de Madrid, Ingeniero Eléctrico-EPN, Profesor de Ingeniería Eléctrica - Universidad Politécnica Salesiana. Autor para Correspondencia: cgallardo@ups.edu.ec

armónico dentro de los límites aceptables de la norma de control de armónicos. Para ilustrar el efecto de reducir el porcentaje de distorsión armónica total de voltaje, y en consecuencia una mejora en la calidad de energía se muestra las formas de onda de voltaje en los nodos de interés.

Palabras Clave: Calidad de Energía, Cargas no lineales, Compensador Estático Variable, Distorsión Armónica Total de Voltaje THDv, Filtros Pasivos de Potencia PPFs, Filtro de única Sintonía.

quality the voltage waveforms shown in the nodes of interest.

Keywords: Power Quality, Nonlinear Loads, Static Var Compensator, Voltage Total Harmonic Distortion, Passive Power filters PPFs, Single Tuned Filters.

1. Introducción

La distorsión armónica es uno de los principales aspectos de la calidad de energía, y es el de más rápido crecimiento en importancia en los últimos años debido a la proliferación de las cargas no lineales y variables en el tiempo de sistemas de potencia que absorben corrientes no sinusoidales[1]. Los sistemas de energía eléctrica deben ser diseñados no sólo para las corrientes y voltajes sinusoidales sino también para cargas no lineales[2]. Este tipo de cargas pueden introducir contaminación armónica, distorsionar las formas de onda de corriente y voltaje, crear resonancias, aumentar las pérdidas del sistema y reducir la vida útil de los equipos eléctricos[3]-[4]. Esto requiere de un análisis cuidadoso de generación de armónicos, mediciones, estudio de los efectos perjudiciales, controles de armónicos y limitación de los niveles aceptables[5].

El interés en el análisis armónico se remonta a principios de 1990 en relación con los sistemas de alta tensión de corriente continua (HVDC) y cargas no lineales como los compensadores estáticos variables (SVC)[6]. Otros ejemplos de cargas no lineales son los tiristores controlados por reactores (TRCs), rectificadores controlados por silicio (SCR), inversores, centrales eólicas, centrales solares y sistemas de carga de vehículos eléctricos[4]-[7].

Una metodología para análisis de armónicos puede ser en base al uso del modelo de Norton para representar el circuito equivalente de armónicos. El análisis se lleva a cabo utilizando los parámetros y las corrientes armónicas de origen del equivalente Norton para encontrar la relación entre la impedancia armónica y la fuente de tensión armónica a partir de mediciones tomadas en el PCC (point of common connection)[1]. Otro método es conocido como el principio de método crítico de impedancia, cuyo principio es

comparar dos magnitudes de fuentes de voltajes armónicos en el circuito equivalente de Thevenin y elegir el más grande como la fuente principal de armónicos[8]-[1].

Ciertamente, este tipo de método puede detectar que lado contribuye un nivel superior a la PCC. Sin embargo, estos procedimientos requieren el conocimiento de la red y el consumo de impedancias armónicas[9].

Para desarrollar un análisis analítico de armónicos se desarrolla un método en el dominio del tiempo o frecuencia. En este trabajo se ha realizado los cálculos armónicos en el dominio de la frecuencia utilizando el modelo de barrido de frecuencia (Frequency Scan)[10].

1.1 Estándar IEEE 519 para la limitación armónica.

Con el fin de evitar que los armónicos afecten negativamente al suministro de la red, el estándar IEEE 519-2014 se ha establecido como las prácticas y requisitos recomendados para el control de armónicos en sistemas de energía eléctrica.

Tabla 1: Límites de Distorsión de Voltaje[11].

Bus voltage V at PCC	Individual Harmonic (%)	Total harmonic distortion THD(%)
V≤1,0 kV	5	8
1kV≤V≤69kV	3	5
69kV≤V≤161kV	1,5	2,5
161kV	1	1,5 ^a

Todos los valores deben estar en porcentaje a la frecuencia de la tensión nominal en el PCC. La tabla 1 se aplica a los armónicos de tensión cuyas frecuencias son múltiplos enteros de la frecuencia de red[11].

1.2 Cálculo del factor armónico THD.

La distorsión en las formas de onda de tensión y corriente se define por la distorsión armónica total (THD), el cual es un índice importante ampliamente usado para describir problema de calidad de energía en los sistemas de transmisión y distribución[12].

El THD representa la contribución de cada componente armónica individual de la señal. La definición de THD para señales de voltaje es la siguiente:

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} V_h^2}}{V_1} \cdot 100\% \quad (1)$$

Donde V_h es el armónico de voltaje de orden h y V_1 el voltaje a frecuencia fundamental[11].

2. Filtros Pasivos de Potencia

Los Filtros de potencia pasivos en comparación con otros métodos y otros tipos de filtros PPFs (Passive Power Filters), son ampliamente utilizados para la mitigación de efectos armónicos en sistemas de potencia debido a su bajo costo y simplicidad[2]. Los filtros se instalan normalmente cerca de las cargas no lineales que pueden producir corrientes armónicas, funcionan según el principio de la resonancia eléctrica que ofrecen impedancia mínima al flujo de corriente a la frecuencia resonante[13]. Así que cuando están sintonizados a las frecuencias correspondientes a las diversas órdenes de armónicos, pueden reducir los armónicos de órdenes particulares. Los filtros pasivos se clasifican en filtros de única sintonía, doble sintonía y pasa altos basados en el número de frecuencia de resonancia que tienen[14]. En general, un PPF se compone de elementos pasivos tales como resistencias, inductores y condensadores. La Figura 1 muestra la

disposición de los elementos en los PPFs .

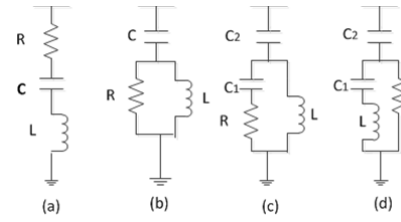


Figura 1. PPFs : (a) única sintonía, (b) segundo orden amortiguado, (c) tercer orden amortiguado, (d) amortiguado tipo c[2].

Los filtros armónicos de única sintonía tienen una frecuencia de resonancia y pueden eliminar los armónicos de orden individuales, filtros armónicos de doble sintonía están sintonizados con dos frecuencias de resonancia y ellos pueden eliminar dos armónicos simultáneamente, mientras los filtros de tercer orden y tipo c amortiguan las componentes armónicas por encima de una frecuencia de corte en particular[14]. Todas las configuraciones anteriores consisten en elementos puramente pasivos y el concepto operativo se basa en la impedancia mínima proporcionada por los filtros a la frecuencia de resonancia en este caso la frecuencia de los componentes armónicos[15].

2.1 Diseño de unidades de filtración armónica de sistemas de potencia

Antes del diseño de un PPFs se debe realizar el cálculo de la potencia reactiva demanda en el PCC .Los PPF también se utilizan para la compensación de potencia reactiva a la frecuencia fundamental.

La potencia reactiva demandada en PCC es calculada por la ecuación (2).

$$Q_{eff} = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \quad (2)$$

En (2) θ_1 y θ_2 es el ángulo existente y el ángulo a ser obtenido del sistema

respectivamente. El factor de potencia $\cos\theta_2$ estará entre los valores 0.92 a 1 para evitar penalizaciones[16]. La demanda de potencia reactiva del sistema será calculada por la ecuación (2). El valor de la potencia reactiva del banco de capacitores será seleccionado por valores comerciales, dados por el estándar IEEE -18-2012 [17].

La fórmula para el cálculo de los valores de RLC en base a la frecuencia de resonancia para los dos filtros individuales y dobles sintonizados está dada por:

$$fr = 1/(2\pi\sqrt{LC}) \quad (3)$$

$$fr = 1/(2\pi RC) \quad (4)$$

Donde R, L y C son valores para los filtros respectivamente resistor inductor y capacitor. La ecuación 3 describe matemáticamente la relación entre la frecuencia de resonancia y L, C valores como en el caso de filtros simples o dobles sintonizados, la ecuación 4 describe la frecuencia de corte de paso alto o filtros de armónicos amortiguados[13].

La impedancia de la rama del filtro está dada por:

$$z = R + j\left[\omega L - \frac{1}{\omega C}\right] \quad (5)$$

Donde R, L y C son la resistencia, inductancia y capacitancia de los elementos del filtro respectivamente, y ω es la frecuencia angular del sistema de potencia.

El filtro pasivo de una sintonía se compone de un capacitor en serie con un reactor. Las fórmulas que se indican a continuación se pueden utilizar para el diseño de un solo filtro sintonizado[18]

La potencia reactiva del filtro se toma a partir del conjunto de potencia reactiva requerida para la mejorar la tensión del bus donde el filtro pasivo es conectado.

Q_{eff} se calcula despejando la ecuación (5) y la reactancia capacitiva del filtro está determinada por la ecuación (6)[4].

Reactancia efectiva del filtro armónico:

$$X_{eff} = \left(\frac{kV_{LLsys}^2}{Q_{eff}(Mvar)} \right) \quad (6)$$

Reactancia Capacitiva:

$$X_c = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff} \quad (7)$$

La frecuencia a la cual el filtro es sintonizado es entonces la definida por el valor de ω que hace la reactancia inductiva y capacitiva se cancelen la una con otra en la ecuación (5). Si se hace 'h' el radio entre la armónica y la frecuencia fundamental del sistema, la reactancia inductiva y capacitiva en la armónica de barrido de frecuencia puede ser expresada por:

$$X_{Lh} = h \cdot \omega_L \quad (8)$$

$$X_{Ch} = \frac{1}{(h \cdot \omega_c)} \quad (9)$$

Asumiendo la resistencia cero, la condición para la impedancia en la ecuación (5) cae a cero a la frecuencia sintonizada requerida:

$$X_{Ch} = X_{Lh} \quad (10)$$

Sustituyendo la ecuación (8) y (9) en la ecuación (10) y resolviendo para 'h', se obtiene:

$$h = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (11)$$

Reactancia Inductiva

$$X_L = \frac{X_C}{h_n^2} \quad (12)$$

Reactancia característica

$$X_n = \sqrt{X_c \cdot X_L} \quad (13)$$

Resistencia de una sintonía

$$R_S = \frac{X_n}{Q} \quad (14)$$

Donde h_n es el orden sintonizado, Q es el factor de calidad.

3. Propagación de Armónicas en un SEP

3.1 Barrido de frecuencia (frequency scan).

El método de barrido de frecuencia es una técnica utilizada para el análisis de armónicos, proporciona una gráfica de módulos de impedancia versus la frecuencia en un nodo del SEP, donde se inyecta una corriente de 1 [pu] a una frecuencia dada en el nodo de interés, las demás corrientes se fijan en cero y se calcula la tensión que aparece en dicho nodo[10]. Este cálculo se realiza para un determinado rango de frecuencias. El cálculo de voltajes se basa en la expresión de la matriz.

$$[V_h] = [Z_h][I_h] \quad (15)$$

Donde $[V_h]$, $[Z_h]$ y $[I_h]$ son el vector de voltajes, matriz de impedancia de bus y el vector de corrientes de inyección para las frecuencias armónicas h .

$$[V_h] = [Z_h] \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_h^{1,j} \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_h^{j,j} \\ \cdot \\ \cdot \\ Z_h^{n,j} \end{bmatrix} \quad (16)$$

Donde $I_h^j = 1$ en [pu] es el fasor de la corriente a frecuencia armónica

inyectada en el nodo j , $Z_h^{j,j}$ representa la impedancia equivalente Thevenin o el “Driving Point Impedance” del nodo j cuando se inyecta una corriente unitaria a frecuencia armónica [10].

El análisis de impedancia en función de la frecuencia es útil para identificar si existen condiciones de resonancia serie y paralelo en el SEP. Las resonancias paralelas ocurren en los picos, dadas por las máximas impedancias, y las resonancias serie ocurren en los puntos más bajos localizados con los valores mínimos de impedancia[4].

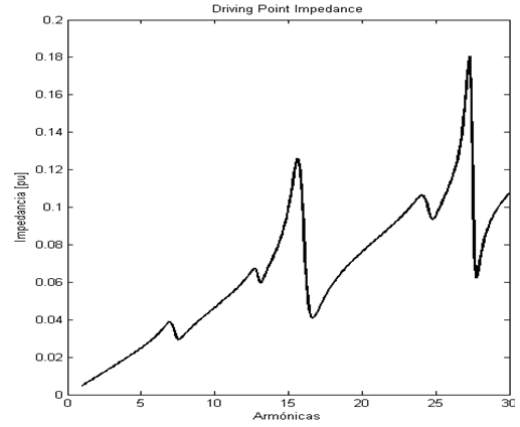


Figura 2. Driving Point Impedance [Autor].

La resonancia serie indica que las reactancias capacitiva e inductiva de los elementos son iguales pero con diferente signo a una determinada frecuencia; anulándose las reactancias y quedando solo el valor de la resistencia, creando un camino de baja impedancia para la circulación de corrientes armónicas[19]-[20].

La resonancia paralela indica que las reactancias capacitiva e inductiva son iguales pero con signo diferente; lo cual hace que exista un elevado valor de impedancia, y tiene el efecto de producir una distorsión en el voltaje[6].

3.2 Método de inyección de corriente en el dominio de la frecuencia.

La matriz de admitancias nodales se forma para las armónicas que inyectan las cargas no lineales, el vector de inyecciones armónicas tiene valores de cero a excepción de los nodos que contengan las cargas no lineales, que es donde se encuentra la inyección armónica[19].

Para calcular las tensiones armónicas de los nodos generalmente, los programas de análisis de armónicos utilizan modelos lineales, donde las cargas no lineales están representadas por las fuentes de armónicos de corriente constante ideales. Para calcular las tensiones armónicas en los nodos se utiliza la siguiente ecuación[21].

$$V_h = Y_h^{-1} \cdot I_h \quad (17)$$

$$\begin{bmatrix} I_h^1 \\ I_h^i \\ I_h^j \\ I_h^N \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_h^{11} & Y_h^{1i} & Y_h^{1j} & Y_h^{1N} \\ Y_h^{i1} & Y_h^{ii} & Y_h^{ij} & Y_h^{iN} \\ Y_h^{j1} & Y_h^{ji} & Y_h^{jj} & Y_h^{jN} \\ Y_h^{N1} & Y_h^{Ni} & Y_h^{Nj} & Y_h^{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_h^1 \\ V_h^i \\ V_h^j \\ V_h^N \end{bmatrix}$$

El procedimiento de análisis es similar al análisis de barrido de frecuencias para las inyecciones actuales en donde las cargas no lineales se representan utilizando corriente armónica espectros de magnitud conocida y fase. Con estos vectores espectrales (magnitud y ángulo en cada armónica de interés) conocida para cada carga, el análisis aproximación procede a lo largo de la siguiente serie de pasos:

- Construir la matriz admitancia del sistema incluyendo las aportaciones de todas las fuentes y cargas lineales.
- Formar el vector inyección de corriente I_h , que es una representación de cargas no

lineales, donde cada entrada es un término de frecuencia conocida en la representación de la de Fourier, con su respectivo ángulo.

- Resolver la ecuación (17) para calcular los voltajes armónicos de los buses de la red, la frecuencia asociada a estos fasores de voltaje son los mismos usados para la construcción de la matriz admitancia[6].

4. Modelamiento de los Componentes del SEP para el Análisis de Armónicos.

El análisis de flujo de potencia armónica requiere que los componentes del sistema se modelan adecuadamente con respecto a la frecuencia. En este documento se proporciona la base fundamental de la modelación de los principales componentes del sistema.

4.1 Líneas de transmisión.

Las líneas de transmisión de longitud aproximadamente a 80 km pueden ser consideradas líneas cortas. La capacidad en paralelo y la conductancia en derivación de las líneas se pueden despreciar. Para líneas de transmisión en el rango de 80-240 km, la admitancia en derivación no puede ser despreciada. Hay dos modelos en uso, el Π - nominal y modelos T-circuitos nominales.

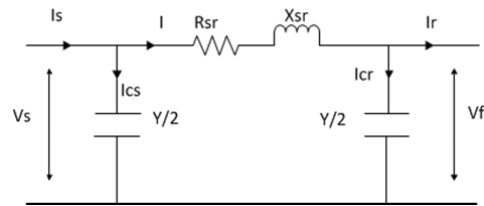


Figura 3. Modelo Π de Líneas de Transmisión. [6]

4.2 Transformadores.

Para el análisis de armónicos, por lo general, no se consideran los modelos de alta frecuencia para transformadores, el cual pueden ser bastante complejo, un transformador de dos devanados simplemente puede ser representado por su impedancia:

$$Z_t = R_T \sqrt{h} + jhX_T \quad (18)$$

Los transformadores son considerados por ser elementos lineales como impedancias series de resistencia y reactancia inductancia, con resistencia R equilibrados por el efecto piel. Donde R_T y X_T están a frecuencia fundamental[6]-[22].

4.3 Generadores.

Los generadores síncronos no producen tensiones armónicas y pueden ser modelados con la impedancia en paralelo a los terminales del generador. Un modelo lineal empírica se sugiere, que consta de reactancia subtransitoria en un factor de potencia de 0,2. El modelo de armónicas para generadores es el siguiente:

$$Z = R \sqrt{h} + jhX_d'' \quad (19)$$

Donde R es producida por las pérdidas de potencia de las máquinas y X_d'' reactancia subtransitoria del generador[6].

4.4 Cargas lineales.

Los modelos de cargas lineales simulan el comportamiento aproximado al real de una carga pasiva frente al análisis de armónicos, la naturaleza de la carga hace que sea difícil establecer modelos para análisis teóricos. Se pueden representar por tres tipos de modelos dados por el CIGRE.

Paralelo $R - X_L$:

$$R(h) = \frac{V_{LL}^2}{P_{3\phi}} \quad (20)$$

$$X_L(h) = j \frac{hV_{LL}^2}{Q_{3\phi}} \quad (21)$$

$$k = 0.1h + 0.9$$

Paralelo $R - X_L$:

$$R(h) = \frac{V_{LL}^2}{kP_{3\phi}} \quad (22)$$

$$X_L(h) = j \frac{hV_{LL}^2}{kQ_{3\phi}} \quad (23)$$

Paralelo $R - X_L$ en serie con X_S :

$$R(h) = \frac{V_{LL}^2}{kP_{3\phi}} \quad (24)$$

$$X_L(h) = j \frac{hR}{6.7(\frac{Q_{3\phi}}{P_{3\phi}} - 0.74)} \quad (25)$$

$$X_S(h) = j0.073hR \quad (26)$$

4.5 Fuentes de generación armónica.

Las principales fuentes de generación armónica en los sistemas de energía son los convertidores de potencia, rectificadores, inversores y hornos de arco, estas fuentes se pueden modelar por fuentes de inyección de corrientes o voltaje armónico.

La inyección de corriente armónica se utiliza para la representación de la contribución armónica de dispositivos como son los tiristores controlados por reactores (TRCs), rectificadores controlados por silicio (SCR) y compensadores estáticos variables (SVC)[22]-[6].

Un SVC puede ser representado por inyección de corriente armónica

$I_h = (\%h) I_{1\phi}$, en donde $I_{1\phi}$ es el corriente a frecuencia nominal, dada por la siguiente ecuación:

$$I_{1\varnothing} = \frac{Q_{3\varnothing}}{\sqrt{3}V_{LL}} e^{j(\theta \pm \frac{\pi}{2})} \quad (27)$$

Para el caso ideal, con la inductancia $L = 0$ y factor de potencia $fp = 1$, la corriente armónica es:

$$I_h = \frac{P}{\sqrt{3}V_h} \quad (28)$$

Los armónicos no sólo son producidos por las cargas no lineales controlados electrónicamente, sino también por los equipos eléctricos, tales como los transformadores, motores y generadores. La saturación durante el funcionamiento normal y los transitorios de conmutación, producirán armónicos[6].

5. Caso de estudio

Para el análisis armónico se propone un sistema eléctrico compuesto por 16 buses conectados entre sí por 9 líneas, modeladas mediante configuración π . Para la generación de armónicos, se utiliza la inyección de fuentes de corrientes ideales mostradas en la tabla2.

En la figura 6 se muestra el modelo equivalente del sistema para el análisis de barrido de frecuencia y tensiones nodales armónicas. Además, se muestran los valores de impedancia, reactancias y potencias del sistema en valores pu.

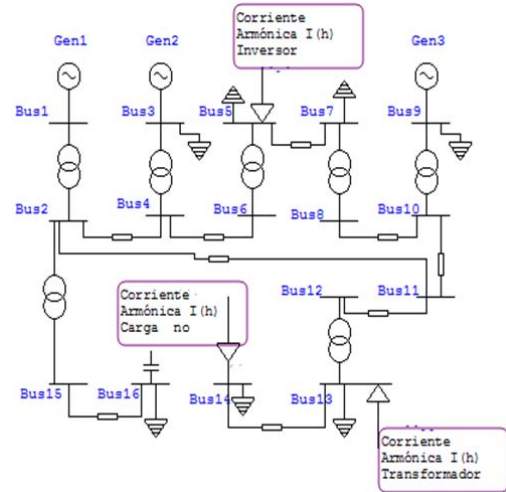


Figura 4. Caso de Estudio[23].

Tabla 2: Valores de Porcentajes de Inyección de Corriente Armónica [24].

Orden Armónico	Horno de Arco(Bus14)	Transformador (Bus13)	Inversor (Bus5)
3	0,29	0,02	0,1
5	0,76	0,2	0,05
7	0,03	0,05	0,298
9	0,02	0,02	0,019

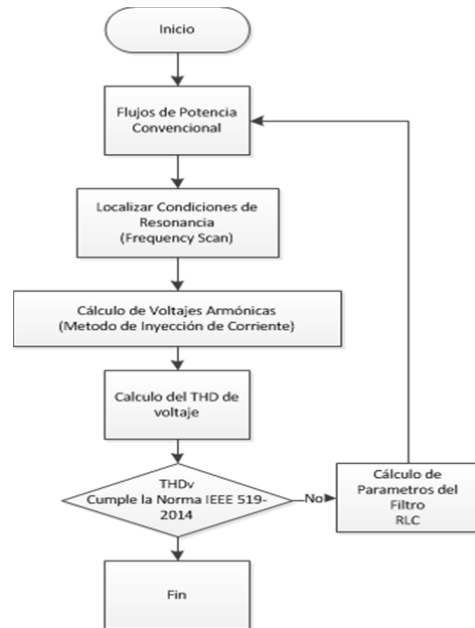


Figura 5. Diagrama de Flujo del Análisis Armónico[23].

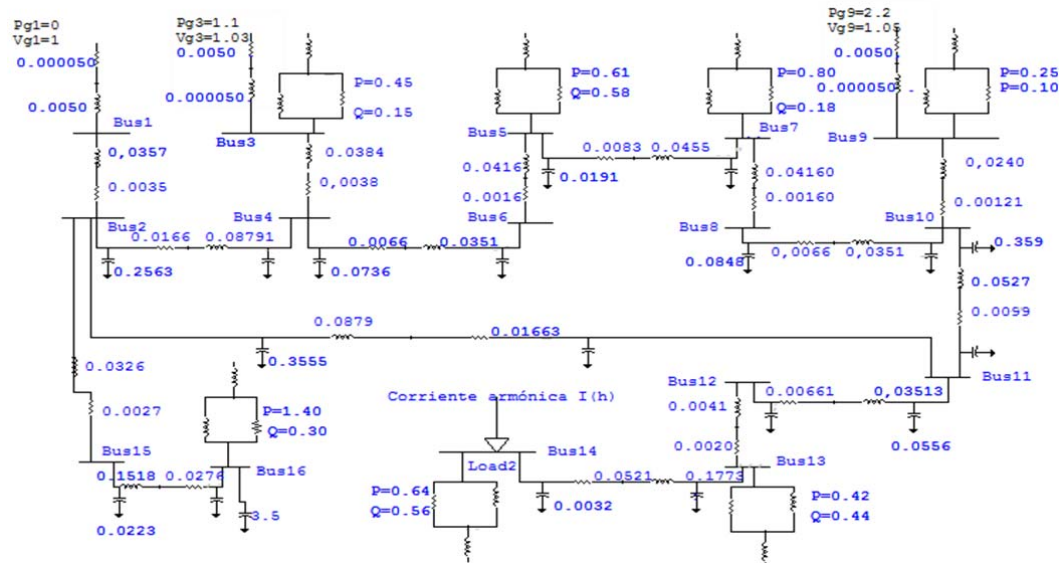


Figura 6. Diagrama de Impedancias para el Estudio Armónico [Autor].

Para efectuar el estudio armónico se sigue el diagrama de flujo de la figura 5. Se utilizan flujos de potencia convencionales para conocer los niveles de voltaje y potencia en estado estacionario. El método de barrido en frecuencia para conocer puntos de resonancia del sistema, el método de inyección de corrientes para determinar las tensiones nodales y a su vez calcular los índices de distorsión armónica.

5.1 Respuesta a la Frecuencia

Para el análisis de puntos de resonancia se ha utilizado la metodología barrido en frecuencia modelado en Matlab, en la figura 7, se muestra el barrido de frecuencia para todas las barras del sistema, el análisis se muestra para las armónicas comprendidas entre el orden 0 y 30, mientras que para la figura 8. Se presenta la gráfica de barrido en frecuencia para las frecuencias armónicas comprendidas entre 0 y 15.

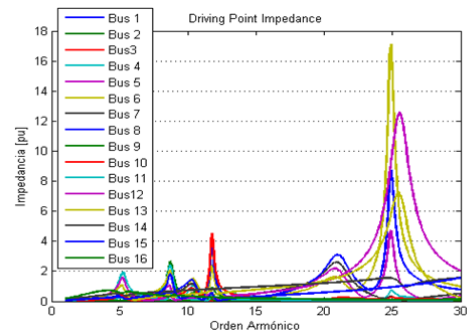


Figura 7. Impedancia de las Barras hasta el Orden Armónico 30[Autor].

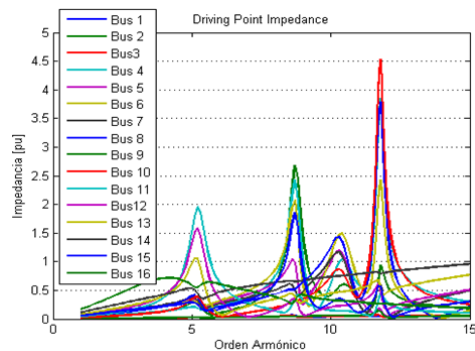


Figura 8. Impedancia de las Barras hasta el Orden Armónico 15[Autor].

De acuerdo al análisis de impedancia en función de la frecuencia mostrada en la figura 7 y 8, el valor pico más preponderante se ubica aproximadamente en la frecuencia armónica 25. Adicionalmente, existen valores picos con menos valores de impedancia que se encuentran en las frecuencias armónicas 21 y 11. Estos valores picos reflejan condiciones de resonancia, pero no tienen efectos perjudiciales al sistema debido a que la inyección de corriente armónica se realiza para las armónicas 3, 5, 7, y 9 de acuerdo a la tabla 2.

En la figura 8, se observa valores picos para el orden armónico 3, 5 y 9 que tienen menos valores de impedancias, estos órdenes armónicos tienen mayor relevancia para el sistema por la presencia de resonancia e inyección de corriente armónica.

5.2 Tensiones armónicas sin filtro PPFs

Los resultados del análisis al usar el método de inyección de corrientes son un vector de tensiones armónicas para cada bus del sistema, los términos en cada vector de tensión corresponden a los coeficientes de Fourier de voltaje, mostrada en la gráfica 9 en forma de espectros armónicos.

En la figura 10, se muestra la forma de ondas de voltaje distorsionadas por el contenido armónicos presentes para los órdenes 3, 5 y 7 que se muestran en la gráfica 9.

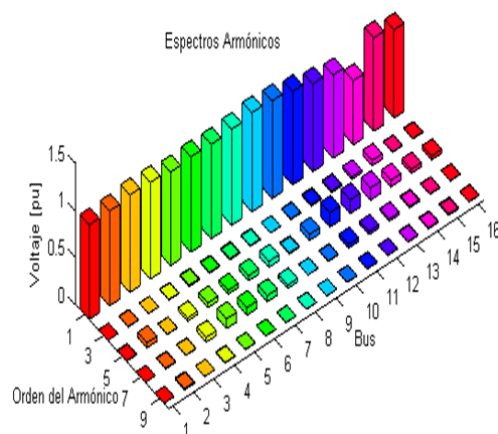


Figura 9. Espectro Armónico de Voltaje sin filtros [Autor].

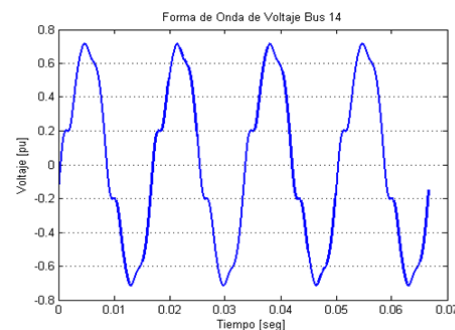
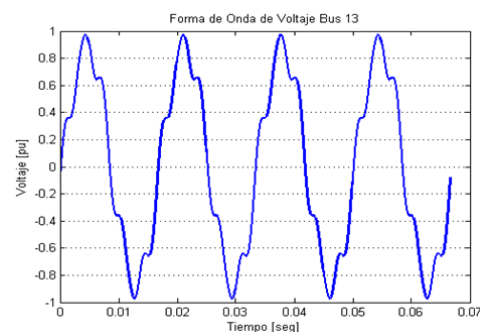
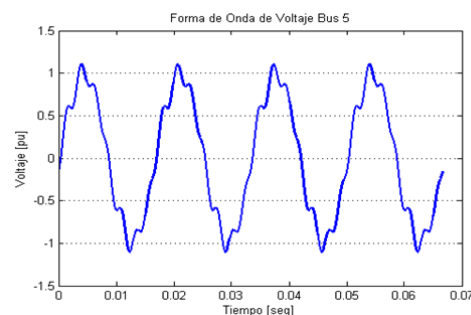


Figura 10. Onda de voltaje sin filtro para los Buses con Inyección Armónica [Autor].

5.3 Valores de la distorsión armónica sin filtro PPFs.

Tabla 3: Porcentajes de THDv en las Barras [Autor].

BUS	THD(%)	V.Nomi.		
		KV	1kV≤V≤69kV THD > 5%	69kV≤V≤161kV THD >2,5%
1	0,7140	13,8		
2	5,6876	115		X
3	0,6758	13,8		
4	5,9632	115		X
5	11,9632	23	X	
6	9,0820	115		X
7	8,6251	23	X	
8	7,2199	115		X
9	1,0984	13,8		
10	6,4908	115		X
11	15,9726	115		X
12	16,269	115		X
13	15,3122	23	X	
14	13,4298	23	X	
15	4,7165	23		
16	4,6817	23		

La tabla 3 muestra los valores de THD de voltaje calculados para cada Bus. Se determina que los buses 5,7, 13,14 superan los límites para barras entre voltajes de 1kV y 69KV, mientras que buses 2, 4, 6, 8, 10, 11 y 12 superan la norma para barras entre voltajes de 69kV y 161kV.

5.4 Cálculo parámetros RLC del PPFs.

Para el diseño de los parámetros del filtro se hace referencia a la Guía para Aplicaciones y Especificaciones de Filtros Armónicos, IEEE Std 1531™ - 2003.

Los condensadores con construcción de película metalizada pierden capacitancia a medida que envejecen, lo que resulta un aumento gradual de la frecuencia de sintonía cuando se utilizan como filtros armónicos. Usando de tablas de envejecimiento de los fabricantes de condensadores, un filtro armónico sintonizado al 6% por debajo de su frecuencia nominal tendrá una sintonía

aceptable al final de su vida útil 20 años. Este criterio se ha tomado en cuenta para eliminar la 5 armónica en el bus 14 sintonizada a un -6% de la frecuencia nominal[25].

La potencia reactiva efectiva Q_{eff} del filtro armónico necesaria para mejorar el factor de potencia fp_1 (Asociado con θ_1) a fp_2 (Asociado con θ_2) está dada por la ecuación (2).

Se selecciona un banco de capacitores necesarios para mejorar el factor de potencia de un valor calculado a otro de $fp_2=0.97$

$$Q_{eff} = P(\tan\theta_1 - \tan\theta_2)$$

$$Q_{eff} = 0.72 * 84.14(\tan(\cos^{-1}0.72) - \tan(\cos^{-1}0.97))$$

$$Q_{eff} = 42.71MVA$$

Tomando como referencia el estándar para capacitores de potencia en derivación IEEE Std 18™ 2012, la potencia reactiva a un valor comercial será:

$$Q_{eff} = 45MVA$$

Se calcula la reactancia efectiva del filtro por la ecuación (6).

$$X_{eff} = \left(\frac{kV_{LLsys}^2}{Q_{eff}(MVA)} \right)$$

$$X_{eff} = \left(\frac{23kV^2}{45(MVA)} \right)$$

$$X_{eff} = 11.755\Omega$$

La ecuación para calcular la reactancia capacitiva para un filtro sintonizado a la armónica h está dada por:

$$X_c = \left(\frac{h^2}{h^2 - 1} \right) X_{eff}$$

$$X_c = \left(\frac{(7 - 0.06)^2}{(7 - 0.06)^2 - 1} \right) 12.5952\Omega$$

$$X_c = 12.0047\Omega$$

$$X_c[p.u] = 2.2693$$

La ecuación para calcular la reactancia inductiva es la ecuación (12).

$$X_L = \frac{X_c}{h^2}$$

$$X_L = \frac{12.0047}{(7 - 0.006)^2}$$

$$X_L = 0.2492\Omega$$

$$X_L[p.u] = 0.047$$

Para calcular la resistencia del filtro su usa la ecuación (14).

$$R = \frac{X_L(f)}{Q_f}$$

$$R = \frac{0.2492\Omega(7 - 0.06)}{20}$$

$$R = 0.0864\Omega$$

$$R[p.u] = 0.016$$

Los parámetros RLC del filtro sintonizado a la séptima armónica están dados por $X_c = 12.0047\Omega$, $X_L = 0.2492\Omega$ y $R = 0.0864\Omega$.

Tabla 5: Parámetros RLC del Filtro Sintonizado al Orden Armónico 3[Autor].

Parámetros RLC	45MVA /23KV	
Xc	2.6924[pu]	14.2430Ω
XL	1.6478 [pu]	1.6478Ω
R	0.0457[pu]	0.24Ω

Tabla 6: Parámetros RLC del Filtro Sintonizado al Orden Armónico 5[Autor].

Parámetros RLC	33.6MVA /23KV	
Xc	2,2693[pu]	12,0047Ω
XL	0,047[pu]	0,2492Ω
R	0,016[pu]	0.0864Ω

Tabla 7: Parámetros RLC del Filtro Sintonizado al Orden Armónico 7[Autor].

Parámetros RLC	45MVA /23KV	
Xc	2,2693[pu]	12,0047Ω
XL	0,047[pu]	0,2492Ω
R	0,016[pu]	0.0864Ω

5.5 Respuesta a la frecuencia con PPFs.

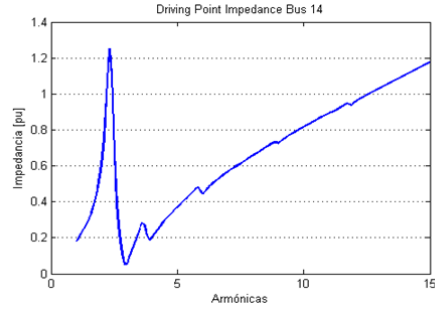


Figura 11. Impedancia para la barra 14, con PPFs Sintonizado al Orden Armónico 3[Autor].

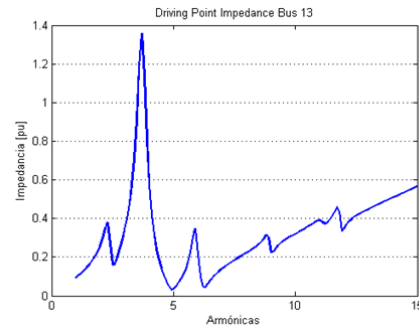


Figura 12. Impedancia para la barra 13, con PPF Sintonizado al Orden Armónico 5[Autor].



Figura 13. Impedancia para la Barra 5, con PPF Sintonizado al Orden Armónico 7[Autor].

Con la integración de los PPFs en los buses con inyección armónica, y sintonizados a cada orden armónico a ser filtrado. En las gráficas de barrido de frecuencia de las figuras 11, 12 y 13, se han suprimido las condiciones de resonancia paralela, presentando bajos valores de impedancia a los órdenes sintonizados.

5.6 Tensiones armónicas con PPFs.

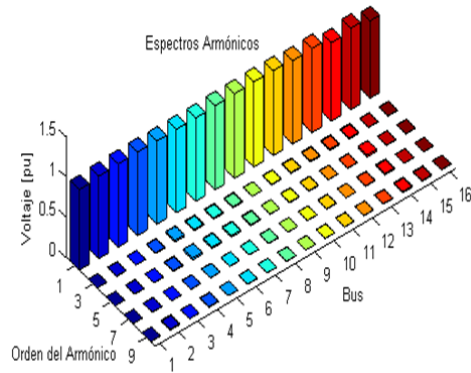


Figura 14. Espectro Armónico de Voltaje con filtro PPFs[Autor].

Tabla 8: Porcentajes de THDv con y sin PPFs[Autor]

BUS	V. Nominal kV	Sin Filtro THD(%)	Con filtro THD(%)	Porcentaje Reducido
1	13,8	0,714	0,1861	73,94
2	115	5,6876	1,456	74,40
3	13,8	0,6758	0,1674	75,23
4	115	5,9632	1,4552	75,60
5	23	11,9632	3,2892	72,51
6	115	9,082	2,2892	74,79
7	23	8,6251	2,3686	72,54
8	115	7,2199	1,6672	76,91
9	13,8	1,0984	0,1783	83,77
10	115	6,4908	1,031	84,12
11	115	15,9726	1,4412	90,98
12	115	16,269	1,3764	91,54
13	23	15,3122	1,7843	88,35
14	23	13,4298	3,6097	73,12
15	23	4,7165	1,2299	73,92
16	23	4,6817	0,7529	83,92

La tabla4 muestra los porcentajes de THD_v dentro de los límites aceptables de norma IEE519-2014, después de incorporar al sistema los PPFs.

Las buses de 13KV y 23KV no superan el 5%, los buses 5, 7, 13 y 14, tiene porcentajes de 3.2892, 2.3686, 1.7843 y 3.6097, es decir, han sido disminuidos el 72.51%, 72.54% 88,35% y 73.12%

respectivamente.

Para los buses de 115KV, se tienen porcentajes menores a 2.5%, los buses 2, 4, 6, 8, 10, 11 y 12 disminuyeron el contenido armónico en 1,456, 1,4552, 2,2892, 1,6672, 1,031, 1,4412, 1,3764 , es decir, el 74.40%, 75.60%, 74.90%, 76.91%, 84.12% y 90.98% respectivamente.

Las ondas de voltaje sinusoidales ideales mostradas en las gráficas de la figura 12, es el efecto de reducir los porcentajes de THD_v a valores aceptables .Además, en la figura 9, se muestra los espectros sin voltajes armónicos.

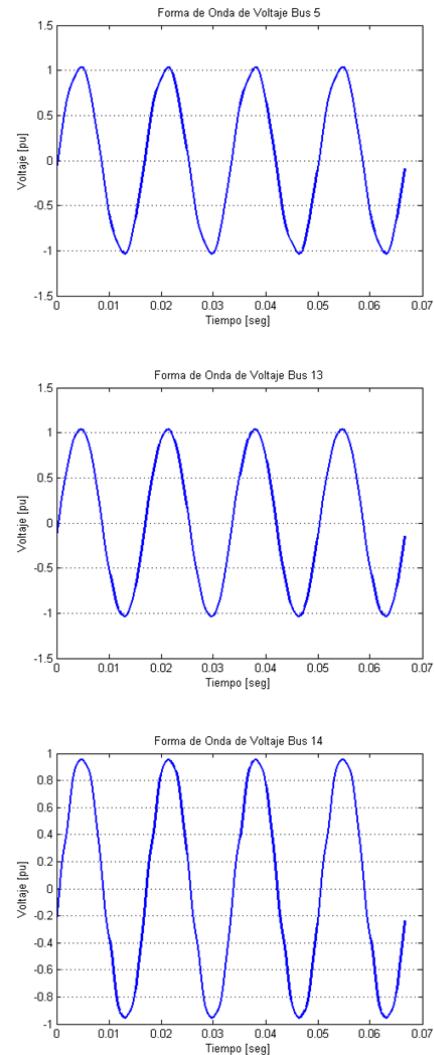


Figura 15. Formas de Onda de Voltaje con FFPs para los Buses con Inyección Armónica [Autor].

6. Resultados y Discusión

En este trabajo se ha presentado un estudio para mitigar la distorsión armónica a límites aceptables según la norma IEEE Std 519TM 2014.

Con el análisis de impedancia en función de la frecuencia, se identificó condiciones de resonancia paralela para los órdenes armónico 3, 5 y 7, en estos ordenes se presentaron voltajes armónicos en las barras, esto por tener una elevada impedancia e inyección de corriente armónica en los buses 5, 13 y 14.

Para reducir los porcentajes de THD_v , se incorporó al sistema filtros pasivos de sintonía única, los parámetros RLC se calcularon bajo el estándar IEEE Std 1531TM 2003, y se sintonizaron a la tercera, quinta y séptima armónica, para los buses con inyección armónica.

Con la integración al sistema de los PPFs, los buses de 13KV y 23KV con inyección armónica, no superan el 5%, los buses 5, 7, 13 y 14, tiene porcentajes de 3.2892, 2.3686, 1.7843 y 3.6097, es decir, han sido disminuidos el 72.51%, 72.54%, 88,35% y 73.12% respectivamente.

Para ilustrar el efecto de la mitigación de la distorsión armónica total de voltaje THD_v , en el Bus5, Bus13 y Bus14, se muestra la forma de onda de voltaje aproximada idealmente ondas sinusoidales.

7. Conclusiones

Del análisis armónico realizado en este trabajo, se puede observar que después de la instalación de los filtros pasivos de sintonía única, los índices de distorsión armónica total de voltaje THD_v están dentro de los límites aceptables de la norma de control de armónicos IEE519-2014.

De este modo es un testimonio de la mejora de la calidad de la energía. Este concepto de filtrado de armónicos pasivo puede ser fácilmente incorporado en una forma económica, robusto en diseño y funcionamiento. Es por estas razones que todavía se utiliza en aplicaciones a gran escala.

Referencias

- [1] R. S. Herrera and P. Salmern, "Harmonic disturbance identification in electrical systems with capacitor banks," *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 82, no. 1, pp. 18–26, 2012.
- [2] N.-C. Yang and M.-D. Le, "Optimal design of passive power filters based on multi-objective bat algorithm and pareto front," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 7, pp. 644–654, 2015.
- [3] H. Abniki, S. Nateghi, R. Ghandehari, and M. N. Razavi, "Harmonic analyzing of wind farm based on harmonic modeling of power system components," *2012 11th Int. Conf. Environ. Electr. Eng. IEEEIC 2012 - Conf. Proc.*, pp. 667–672, 2012.
- [4] Y. P. Obulesu, M. Venkateswara Reddy, and Y. Kusumalatha, "A %THD analysis of industrial power distribution systems with active power filter-case studies," *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 60, pp. 107–120, 2014.
- [5] M. Tali, A. Obbadi, A. Elfajri, and Y. Errami, "Passive filter for harmonics mitigation in standalone PV system for non linear load," *Proc. 2014 Int. Renew. Sustain. Energy Conf. IRSEC 2014*, pp. 499–504, 2014.

- [6] J. C. Das, *Harmonic Modeling of Systems*. Power System Harmonics and Passive Filter Designs, Ed. Wiley, New Jersey, 2015, pp. 379–745.
- [7] B. Manjulata, “Power quality improvement using passive shunt filter, TCR and TSC combination,” M.S. thesis, Dept. Elect. Eng., Rourkela, India, 2015.
- [8] D. Alcantara, “Análisis de Resonancia Armónica en una Red de Distribución,” Electrical Engineering, Dept. Elect. Eng., National Polytechnic Institute, Mexico, 2012.
- [9] H. M. Zubi, “A Genetic Algorithm Approach for Three-Phase Harmonic Mitigation Filter Design,” Ph.D. dissertation, Dept. Elect. Eng., University of Bath, Inglaterra, 2013.
- [10] J. C. Leite, I. P. Abril, M. E. De Lima Tostes, and R. C. Limão De Oliveira, “Frequency scan on a phase-coordinates frame for unbalanced systems,” *Electr. Power Syst. Res.*, vol. 93, pp. 113–119, 2012.
- [11] *IEEE Recommended Practice and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems, IEEE Std 519TM*. 2014.
- [12] D. Kumar and F. Zare, “Analysis of harmonic mitigations using hybrid passive filters,” *16th Int. Power Electron. Motion Control Conf. Expo. PEMC 2014*, pp. 945–951, 2014.
- [13] H. Prasad, T. D. Sudhakar, and M. Chilambarasan, “Mitigation of current harmonics in a solar hybrid system by installation of passive harmonic filters,” *2015 Int. Conf. Comput. Power, Energy, Inf. Commun.*, pp. 0345–0349, 2015.
- [14] M. R. Arif, F. Mahmood, M. Hashmi, and S. Hanninen, “Application of passive filters to mitigate power quality problems caused by induction furnaces,” *Proc. 2012 IEEE Int. Conf. Cond. Monit. Diagnosis, C. 2012*, no. September, pp. 1227–1230, 2012.
- [15] A. B. Lashari and I. Ansari, “Harmonics Analysis and Mitigation Using Passive filters,” Electrical Engineering, Dept. Elect. Eng., Univ. Jamshoro, Pakistan, 2015.
- [16] M. M. Ertay, “Simulated Annealing Based Passive Power Filter Design for a Medium Voltage Power System,” *Simulated annealing based Passiv. power filter Des. a Mediu. Volt. power Syst.*, pp. 1–5, 2012.
- [17] *IEEE Standard for Shunt Power Capacitors, IEEE Std 18TM*. 2012.
- [18] C. L. Su and C. J. Hong, “Design of passive harmonic filters to enhance power quality and energy efficiency in ship power systems,” *Conf. Rec. - Ind. Commer. Power Syst. Tech. Conf.*, pp. 1–8, 2013.
- [19] F. C. De la Rosa, *Harmonic Analyses*. Harmonics and Power Systems, Ed. Taylor & Francis, USA, 2006, pp. 139–170.
- [20] F. D. Freijedo, S. K. Chaudhary, R. Teodorescu, J. M. Guerrero, C. L. Bak, L. H. Kocewiak, and C. F. Jensen, “Harmonic resonances in Wind Power Plants: Modeling, analysis and active mitigation methods,” *2015 IEEE Eindhoven PowerTech, PowerTech 2015*, vol. 12188, 2015.

- [21] H. Hu, Z. He, and S. Gao, "Passive filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics," *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 30, no. 1, pp. 505–514, 2015.
- [22] Mohammed k, "Harmonics Analysis and Calculation in Power System Networks," no. Eng. &Technology, Vol., No., 2008.
- [23] H. Alvarado, "Metodologia para el analisis de propagacion y filtrado de armonicas en sistemas electricos," Electrical Engineering, Dept. Elect. Eng., National Polytechnic Institute, Mexico, 2010.
- [24] W. T. Jewell, R. C. Dugan, and J. A. King, "Distribution feeder harmonic study methodology," *IEEE Trans. Power Appar. Syst.*, vol. PAS-103, no. 12, pp. 3663–3671.
- [25] *IEEE Guide for Application and Specification of Harmonic Filters, IEEE Std 1531TM*. 2003.

Anexos

Flujos Armónicos sin PPFs

Bus	Armónica 1		Armónica 3		Armónica 5		Armónica 7		Armónica 9	
	Voltaje	Angulo(deg)	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1	1	0	0,0007	53,1903	0,0068	-3,8606	0,0009	-177,4451	0,0019	-1,51
2	1,0047	-3,0346	0,0054	51,8045	0,0543	-4,6418	0,0072	-177,9738	0,0155	-1,9015
3	1,0318	-1,2753	0,0007	49,7791	0,0038	-4,2785	0,0057	-131,6015	0,0008	-5,785
4	1,0227	-2,5939	0,0062	48,636	0,0333	-4,6734	0,0502	-131,6342	0,0073	-5,6043
5	0,9913	-4,7037	0,0163	47,8165	0,0495	-4,6496	0,1042	-128,5686	0,0027	-171,0802
6	1,0081	-3,4956	0,011	47,3826	0,0422	-4,8801	0,0805	-129,9742	0,0031	-11,3402
7	1,0006	-4,5572	0,0126	46,3939	0,0551	-6,9828	0,0651	-137,2956	0,003	159,6993
8	1,0173	-2,5017	0,0097	49,6218	0,0634	-1,8862	0,0355	-143,9939	0,0039	150,6895
9	1,05	1,5284	0,0012	55,9848	0,0114	1,7445	0,0014	170,1405	0,0007	144,5863
10	1,0339	-0,9025	0,0071	55,5798	0,0661	1,6641	0,008	170,217	0,0038	144,7554
11	0,9892	-3,6119	0,0147	59,4519	0,1521	3,1678	0,04	63,1329	0,0034	135,1717
12	0,9277	-5,5576	0,02	61,8329	0,1458	6,3103	0,0331	52,369	0,0042	-156,7448
13	0,883	-8,7785	0,0258	64,0974	0,1303	10,6055	0,0239	30,2469	0,0079	-128,128
14	0,6793	-16,8649	0,0565	67,2462	0,0693	9,7719	0,0155	-25,029	0,0096	-114,6158
15	0,9912	-5,7464	0,0051	43,9988	0,0443	-14,7018	0,0057	178,1735	0,0128	-3,3543
16	0,9339	-19,142	0,0051	3,1933	0,0432	-108,2652	0,003	42,5421	0,0037	-157,4323

Flujos Armónicos con PPFs

Bus	Armónica 1		Armónica 3		Armónica 5		Armónica 7		Armónica 9	
	Voltaje	Angulo(deg)	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo	Voltaje	Angulo
1	1	0	0,0006	31,8569	0,0006	-114,8886	0,0005	106,8168	0,0016	-26,2177
2	1,0231	-2,9379	0,0047	30,471	0,0051	-115,6698	0,0042	106,2881	0,0125	-26,6091
3	1,0318	-1,0529	0,0009	40,1941	0,0012	-117,461	0,0003	143,6703	0,0008	-34,5273
4	1,0376	-2,4346	0,0077	39,051	0,0104	-117,8559	0,0029	143,6376	0,0071	-34,3466
5	1,0326	-4,5496	0,0219	40,8304	0,0255	-117,8089	0,0041	174,3044	0,0013	-146,1523
6	1,0352	-3,408	0,0144	39,5703	0,018	-118,2453	0,0036	160,1948	0,0041	-42,4669
7	1,0352	-4,3213	0,0159	37,2774	0,0183	-121,6445	0,0035	145,3197	0,0017	143,689
8	1,0454	-2,3509	0,011	36,0851	0,0126	-119,2694	0,0038	125,3163	0,003	128,5959
9	1,05	1,6871	0,0011	36,0023	0,0012	-112,4482	0,0007	110,0421	0,0006	122,3686
10	1,0563	-0,7534	0,0066	35,5973	0,007	-112,5286	0,0038	110,1186	0,0035	122,5377
11	1,0522	-3,6258	0,0106	32,2192	0,0075	-96,8729	0,0067	97,1549	0,004	116,3071
12	1,0342	-5,5513	0,0131	32,0513	0,0045	-69,0718	0,001	62,0923	0,0032	-175,1357
13	1,043	-8,0025	0,0157	32,4238	0,0044	-0,8906	0,0063	-70,4501	0,0063	-130,6577
14	0,9736	-14,0256	0,0137	25,9111	0,024	52,7658	0,0166	-75,5558	0,0139	-120,6662
15	1,0112	-5,5483	0,0045	22,4712	0,0042	-126,1291	0,0033	102,5748	0,0103	-27,9838
16	0,9598	-18,3481	0,0047	-17,5429	0,0043	138,4405	0,0018	-35,416	0,003	176,4135

MITIGACIÓN DE LA DISTORSIÓN ARMÓNICA DE UN SEP MEDIANTE FILTROS PASIVOS SINTONIZADOS																							
		DATOS				TEMÁTICA					FORMULACIÓN DEL PROBLEMA		RESTRICCIONES DEL PROBLEMA		PROPUESTAS PARA RESOLVER EL PROBLEMA		SOLUCIÓN PROPUESTA						
1	2015	Passive filter design for China high-speed railway with considering harmonic resonance and characteristic harmonics	Gao Shibin,He Zhengyou,Hu Haitao	\cite{Shibin2015}			✗				✗	✗					✗			✗	✗		✗
2	2015	Optimal design of passive power filters based on multi-objective bat algorithm and pareto front	Yang Nien,Le Minh	\cite{Nien2015}		✗					✗	✗		✗	✗	✗	✗	✗			✗		✗
3	2015	Harmonics Analysis and Mitigation Using Passive Filters	Abdul Basit,Irfan Ansari	\cite{Basit2015}	2	✗					✗	✗			✗				✗	✗			✗
4	2015	Power system harmonics and passive filter designs	J. C. Das	\cite{Das2015}		✗	✗	✗		✗	✗	✗			✗					✗	✗		✗
5	2015	Harmonic Resonances in Wind Power Plants: Modeling, Analysis and Active Mitigation Methods	F. D. Freijedo, S. K. Chaudhary	\cite{Das2015}			✗							✗							✗		✗
6	2015	Mitigation of current harmonics in a solar hybrid system by installation of passive harmonic filters	H. Prasad,Sudhakar, M.Chilambarasan	\cite{Prasad,2015}				✗														✗	
7	2014	Passive Filter for Harmonics Mitigation In Standalone PV System for non Linear Load Mouna	Tali Mouna, Obbadi Abdellatif	\cite{Mouna2014}		✗															✗		
8	2014	Recommended practice and requirements for harmonic control in electric power systems	IEEE Power and Energy Society	\cite{IEEE Std 519-2014}								✗											
9	2014	Analysis of harmonic mitigations using hybrid passive filters	Dinesh Kumar,Firuz Zare,Global Research	\cite{Kumar2014}						✗			✗							✗			
10	2014	A %dTHD analysis of industrial power distribution systems with active power filter-case studies	Y.P. Obulesu, M. Venkateswara Reddyff, Y. Kusumalatha	\cite{Obulesu2014}						✗											✗		✗
11	2013	IEEE Standard for Shunt Power Capacitors	IEEE Power and Energy Society	\cite{IEEE Std 18-2012}																	✗		
12	2013	Design of Passive Harmonic Filters to Enhance Power Quality and Energy Efficiency in Ship Power Systems	Lien Su Chun,CiJhang Hong Department	\cite{Chun2013}		✗											✗				✗		✗
13	2013	A Genetic Algorithm Approach for Three- Phase Harmonic Mitigation Filter Design	M. Hazem	\cite{Hazem 2013}		✗					✗								✗				✗
14	2013	Harmonic Analyzing of Wind Farm Based on Harmonic Modeling of Power System Components	Hassan Abniki,Saeed Nateghi,Reza Ghandehari	\cite{Abnik2013}				✗		✗													

[illegible]